干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

气候变化背景下尼雅河流域生态基流研究

胡可可[1,2]， 何建村[3]， 赵 健[3]， 苏里坦[1]， 张 音[1,2]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院大学资源与环境学院，北京 100049；3. 新疆水利厅水资源规划研究所，新疆 乌鲁木齐 830000）

摘 要：流域生态基流是河流生态系统健康稳定的关键，以新疆尼雅河流域为研究区域，根据民丰县气象站1958—2018年的气象数据与尼雅河4个水文监测断面1978—2018年的水文数据，运用趋势拟合、Tennant法、相关性分析和回归模型等分析流域气候变化、确定生态基流并探究其时空分异与保证率变化，揭示生态基流对气候变化的响应。结果表明：61 a来流域气温以0.22 ℃·$(10a)^{-1}$的速度增加，年降水量以3.8 mm·$(10a)^{-1}$的速度增加；尼雅水库、八一八渠首、尼雅水文站和尼雅渠首的年生态基流推荐值分别为：1.989 $m^3 \cdot s^{-1}$、2.188 $m^3 \cdot s^{-1}$、1.755 $m^3 \cdot s^{-1}$、1.702 $m^3 \cdot s^{-1}$；生态基流年际最大值出现在2010年，最小值在1980年，年内最大值在7月，最小值在1月或12月；空间上表现为上游高下游低，以八一八渠首处最高，尼雅渠首处最低；各站多年平均生态基流保证率分别为：50%、45%、50%、45%，且表现出汛期明显高于非汛期；逐年、逐月生态基流与气温、降水量均在0.01水平上显著相关，但在春夏季对气温敏感，秋冬季对降水量敏感，各水文监测断面的回归模型耦合效果相似，流域整体回归方程R^2=0.365，且生态基流对气候变化响应具有整体性和衰减性。研究结果可为尼雅河流域生态调水和水生态修复提供参考。

关 键 词：气候变化；生态基流；水文学法；保证率；尼雅河
文章编号：

随着社会经济的快速发展，人类对水资源的过度开发利用已经影响了生态系统稳定，尤其是在河流及其沿岸生态系统表现得尤为明显，出现了资源型缺水、水土流失、水质恶化、河道径流量减少以及生物多样性衰减等众多生态环境问题，导致河流生态系统随之不断退化[1-2]。为了缓和水资源开发利用与生态环境保护之间日益加剧的矛盾，实现流域社会经济可持续发展，需要确保河道中拥有一定的水量以维持河流生态系统的稳定[3]。在使河流满足人类生产生活用水的同时，也能够满足生态系统的用水需求，使二者之间达到一种平衡状态，生态基流的概念便随之应运而生。尽管目前还没有统一确定的标准概念来定义生态基流[4-5]，但学术界较为普遍接受的是指在生态需水与人类用水矛盾加剧的背景下，将生态系统健康作为河流健康的最高目标，河道最小流量应满足的最低要求即为生态基流[6]。

自18世纪工业革命以来，人类燃烧大量化石燃料，向空气中排放了大量CO_2等温室气体，使温室效应加剧，全球气温正在经历以变暖为主导的气候变化，降水受到气候变暖的影响出现了时空差异性的响应，但并没有表现出某种确定的变化趋势[7-8]。河流在气温与降水变化的影响下也出现了相应变化，使径流量、水位、流速等水文要素发生了不同程度的波动[9]，导致河流及其流域生态环境稳定受到严重影响[10]，在这样一个复杂的气候变化背景下，生态基流将会如何响应变化目前还尚不明晰。

国外学者对于生态基流的相关研究起步较早，研究内容主要集中在发展水生态系统服务功能价值、提供农业生态系统用水保障、保护河流生态系

收稿日期：2021-10-13； **修订日期**：2021-12-01
基金项目：新疆水利科技专项项目（403-1301-JSN-5MIR）；国家自然科学基金项目（41961002）资助
作者简介：胡可可（1997-），男，硕士研究生，主要从事干旱区生态水文学等方面的研究. E-mail: hukeke20@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：苏里坦（1972-），男，博士，研究员，主要从事干旱区生态水文学等方面的研究. E-mail: sulitan@ms.xjb.ac.cn

统生物多样性、满足流域生态环境保护与开发利用以及生态基流计算方法研究等几个方面[11-13]，已经形成了从理论概念、计算方法到实际应用为体系的完整研究框架。我国于20世纪70年代开始探索对河流生态基流的研究，经过众多学者和管理人员所做的大量研究和应用工作，生态基流研究已经取得了一定的成果。从不同时间、不同空间和不同类型的生态用水入手，有针对性的对我国生态基流开展了多角度研究，建立了适应我国自然生态环境特点的生态基流研究指标体系[14-16]。目前国内外少有学者将气候变化与生态基流相联系进行研究，因此开展气候变化背景下生态基流的响应情况分析具有十分重要的意义。

新疆地处亚欧大陆中部，位于中国西北，由于深居内陆且有高山阻隔，降水稀少而蒸发较大，导致水资源十分匮乏[17]。尼雅河属塔里木河支流，其流域范围是干旱区的典型代表，生态用水极为紧张。因此，本文以新疆尼雅河流域为研究区域，根据民丰县气象站1958—2018年的气象数据与尼雅河4个水文监测断面1978—2018年的水文数据，分析气候变化趋势、确定生态基流及其时空分异与保证率变化，揭示生态基流对气候变化的响应，以期为合理安排调度尼雅河流域生态用水、水资源综合利用与水生态恢复提供科学的参考依据。

1 研究区概况

尼雅河流域位于新疆维吾尔自治区和田地区民丰县中西部，南北长约200 km，东西宽40~90 km，流域总面积10160.96 km^2，流域地处82°36′~82°50′E，36°12′~37°48′N之间。尼雅河是民丰县的第一大河，呈南北走向，发源于昆仑山北麓的吕什塔格峰，为融雨、季节性积雪和山谷冰川融水补给的季节性河流。河流在上游出山口处有恰克达支流汇入，下游无支流汇入。河流源头段呈树枝状水系发育；河道为戈壁、卵石和半胶结砂卵石，两岸植被稀少，自然条件恶劣，沿途稳定性较差；中游冲积平原区是民丰县最大的农业区——尼雅灌区，南北长30 km，耕地面积约33.34 km^2；下游河床由砂砾石逐渐变为细砂，纵坡逐渐变缓，两岸为自然森林保护区，绿洲宽1.5 km，长约75 km，主要有胡杨（*Populus euphratica*）、多枝柽柳（*Tamarix ramosissima*）、芦苇（*Phragmites australis*）等绿洲农田的天然屏障；河道末端消失于塔克拉玛干沙漠深处，具体流域概况见图1所示。

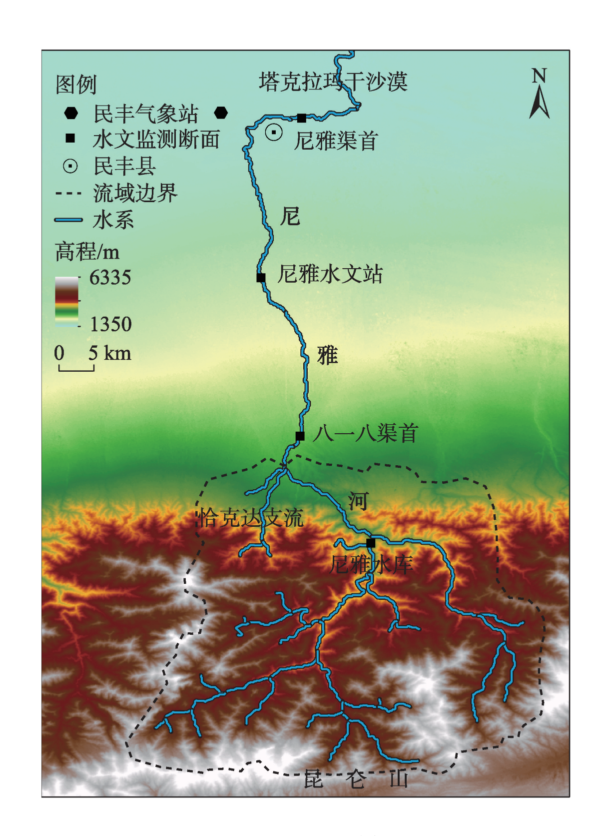


图1 尼雅河流域概况

Fig. 1 Overview of Niya River Basin

2 数据与方法

2.1 数据来源

2.1.1 水文数据 本文选用尼雅河干流上尼雅水库、八一八渠首、尼雅水文站、尼雅渠首4个水文监测断面1978—2018年的水文资料来探究生态基流，其中部分年份由于观测缺失由回归替换法推演获得。具体数据包括日、月、年平均流量及年径流量等，均来源于中华人民共和国水文年鉴《塔里木河流域水文资料》。

2.1.2 气象数据 本文选取尼雅河流域唯一具有长时间序列气象数据的民丰气象站1958—2018年的实测气象数据对流域气候变化进行分析，使用数据内容包括逐日、逐月以及逐年的气温、降水量等，均来源于中国气象数据网（http://data.cma.cn/），其中气温通过标准百叶箱自动监测记录，降水量采用20 cm的标准雨量器人工观测记录。

2.2 研究方法

2.2.1 水文学方法 当前国内外对于生态基流的计算方法主要包括水文学方法、水力学方法、生态模拟法和整体分析法[6]，本文选择水文学方法中常用的Tennant法、90%保证率最枯月平均流量法、最枯月平均流量多年平均值法来计算尼雅河流域生态基流。

（1）Tennant法

Tennant法也叫做Montana法，由Tennant在1976年提出来的[18]。该方法以河流多年平均流量的10%~30%作为生态基流，适用于水文资料系列较长的河流，是目前估算河道生态基流最常用的方法[19]。由于尼雅河属于典型的季节性河流，故本研究将Tennant法做适当改进，将汛期改为5—9月，非汛期改为10—翌年4月，据此得到河流生态基流标准（表1）[18]。

表1 Tennant法推荐的生态基流标准

Tab. 1 Ecological base flow criteria recommended by Tennant method

流量状况	占年均天然径流量比重/%	
	汛期（5—9月）	非汛期（10—翌年4月）
最大	200	200
最佳范围	60~100	60~100
极好	60	40
非常好	50	30
好	40	20
中	30	15
差	10	10
极差	0~10	0~10

Tennant法计算河流生态基流的具体公式如下：

$$Q_i = M_i N_i,\ i = 1,2,\cdots,12 \tag{1}$$

式中：Q_i为第i月生态基流（$m^3 \cdot s^{-1}$）；M_i为第i月平均径流量（$m^3 \cdot s^{-1}$）；N_i为第i月对应生态基流百分比；i为月份。

（2）90%保证率最枯月平均流量法

该计算法是将20 a以上的水文观测资料进行整理和统计分析，本研究对尼雅河各断面每年的月平均径流量进行频率分析，90%保证率下对应的径流量即为所求生态基流[15]。

（3）最枯月平均流量多年平均值法

采用近10 a最枯月平均流量作为当年生态基流，虽然该方法需要的水文观测资料系列较短，但本研究选取1978—2018年共41 a的水文数据，以保证与其他计算方法的时间尺度一致，其计算公式[15]为：

$$Q_i = \sum_{k=1}^{41} \frac{\min(M_{ij})}{41},\ i = 1,2,\cdots,12;\ j = 1,2,\cdots,31 \tag{2}$$

式中：M_{ij}为第i月第j天的平均流量（$m^3 \cdot s^{-1}$）。

（4）生态基流保证率

生态基流保证率是指河流径流能够保证其生态基流的程度，反映河流生态基流的盈亏情况，是生态环境需水与调水的依据[20]。考虑到尼雅河年径流量小、年内流量变化较大和本文研究序列时间长的特点，结合相关研究[21]，提出尼雅河流域年生态基流保证率计算公式为：

$$P_i = \frac{D}{12} \times 100\%,\ Q_k > Q_j;\ i = 1,2,\cdots,41;\ k = 1,2,\cdots,12;\ j = 1,2,\cdots,12 \tag{3}$$

式中：P_i为第i年生态基流保证率（%）；Q_k为该年水文监测断面的第k月平均径流量（$m^3 \cdot s^{-1}$）；Q_j为第j月生态基流（$m^3 \cdot s^{-1}$）；D为满足$Q_k>Q_j$的月数。

2.2.2 统计学方法 本文主要应用的统计学方法有：F检验、趋势分析、相关性分析和回归分析，其中回归分析是为了确定气候变化与生态基流变化之间的具体关系，本文研究气候变化与生态基流之间的变化关系，故采用二元线性回归模型，其表达式为：

$$y = \beta_0 x_1 + \beta_1 x_2 + \varepsilon \tag{4}$$

式中：y为因变量生态基流值；x_1为自变量年均气温值；x_2为自变量年降水量值；β_0和β_1为回归系数；ε为常数项。

3 结果与分析

3.1 气候变化分析

3.1.1 气温变化分析 通过对气温数据进行线性分析、趋势拟合得出1958—2018年尼雅河流域气温以0.22 ℃·(10a)$^{-1}$的速度增暖，与焦文慧等[22]得出新疆气温极值指数以0.5 ℃·(10a)$^{-1}$上升的结论相似。从图2可以看出，1958—2018年尼雅河流域年均气温一直处于波动上升的变化过程，其中1958—1988年处于缓慢增温阶段，气温上升了0.40 ℃；1989—2018年处于相对快速增温阶段，气温上升了1.14 ℃。

3.1.2 降水量变化分析 通过对61 a的年降水量数据进行线性分析、趋势拟合后得出1958—2018年尼

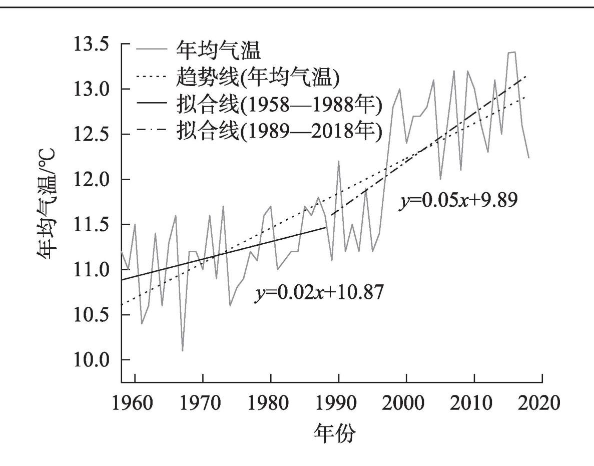


图2　尼雅河流域年均气温变化

Fig. 2　Annual mean temperature change in Niya River Basin

雅河流域年降水量以3.8 mm·(10a)$^{-1}$的速度增加，与施雅风等[23]得出1987—1996年南疆降水比前2个10 a增加23.2%与30.1%的结论一致。从图3可以看出，1958—2018年尼雅河流域的年降水量也处于波动增加的变化过程，期间在1972、1987、2010年和2016年出现了几次骤增和骤减（降水量均骤增至100 mm以上，次年又骤减至50 mm以下），其余年份也存在小范围振荡变化。

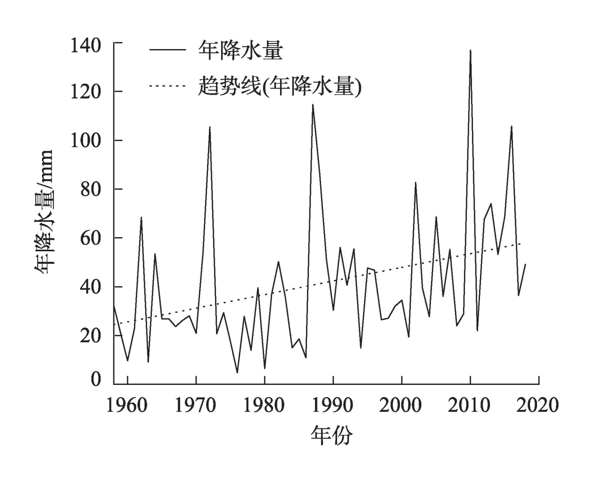


图3　尼雅河流域年降水量变化

Fig. 3　Annual precipitation change in Niya River Basin

通过以上对气温、降水量的分析，结合表2可以得出：新疆尼雅河流域从20世纪50年代开始至今一直处于一个逐渐增暖增湿的变化过程，与吴秀兰等[24]研究结论相同。

3.2　生态基流分析

3.2.1　尼雅河生态基流的确定　本研究采用Tennant法、90%保证率最枯月平均流量法和最枯月平均流量多年平均值法对尼雅河流域生态基流进行

表2　尼雅河流域不同年代气温、降水量及距平

Tab. 2　Temperature, precipitation and anomalies in Niya River Basin in different years

年代	1958—1977年	1978—1997年	1998—2018年
气温/℃	11.04	11.47	12.75
距平/℃	−0.73	−0.30	0.98
降水量/mm	31.47	39.92	51.89
距平/mm	−9.80	−1.35	10.62

计算，结果如图4所示。

由图4可以看出，以上3种计算方法均能很好地反映尼雅河流域生态基流的汛期和非汛期变化，但4个断面的生态基流值均表现为：90%保证率法和最枯月法的生态基流明显高于Tennant法的计算结果，且以最枯月法的计算结果为最高。考虑尼雅河作为干旱区季节性河流水资源稀缺的特点，同时结合生态基流是满足生态系统功能稳定所需求最小水量的概念。因此，本研究以Tennant法所计算的结果作为尼雅河流域生态基流的推荐值，具体结果见表3所示。

由表3可以得出：各水文监测断面生态基流的最大值均出现在7月，最小值出现在1月或12月，且都表现为汛期生态基流量大、非汛期极小的显著变化特点。同时，通过逐月生态基流推荐值可推算得到尼雅水库、八一八渠首、尼雅水文站和尼雅渠首的年生态基流推荐值分别为：1.989 m^3·s^{-1}、2.188 m^3·s^{-1}、1.755 m^3·s^{-1}、1.702 m^3·s^{-1}，最高值出现在八一八渠首，最低值出现在尼雅渠首。

3.2.2　生态基流时空分异特征　从时间上分析，由各水文监测断面的逐年生态基流过程（图5）可以看出，1978—2018年各断面生态基流最大值均出现在2010年，最小值则在1980年，年际间高低变化明显。其中，增幅最大为八一八梁首从20.11 m^3·s^{-1}上升至34.16 m^3·s^{-1}；最小为尼雅渠首从15.72 m^3·s^{-1}上升至26.70 m^3·s^{-1}。结合表3，发现尼雅河流域生态基流年内变化也十分突出，表现为汛期和非汛期差异显著，各断面汛期生态基流均占到全年生态基流的98%以上，反映了尼雅河汛期和非汛期的径流变化过程。这与尼雅河属于季节性河流、以冰雪融水补给为主，气候变暖导致其补给来源发生波动变化引起河流生态基流发生同步变化有关。

从空间分布来看，由4个水文监测断面的生态基流逐季空间分布（图6）可以看出，生态基流总体

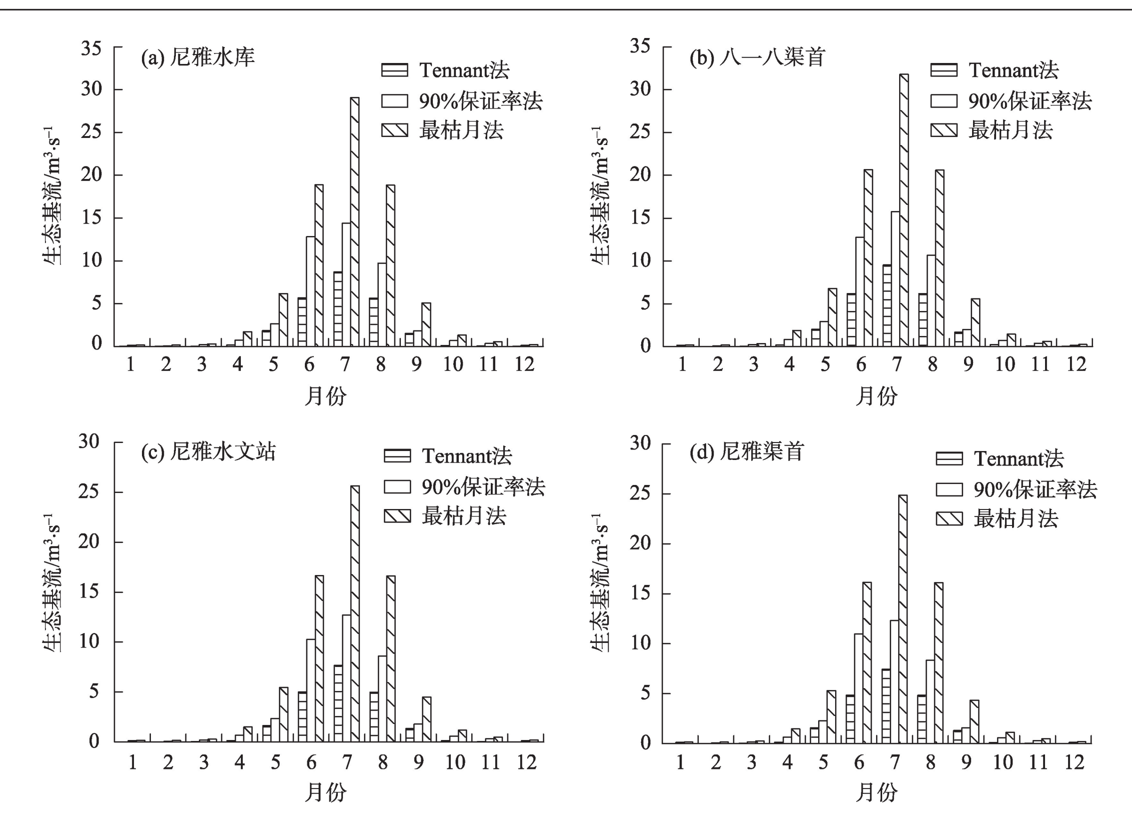


图4 不同方法下尼雅河流域不同水文监测断面逐月生态基流

Fig. 4 Monthly ecological base flow of different hydrological monitoring sections in Niya River Basin under different methods

表3 尼雅河流域不同水文监测断面逐月生态基流

Tab. 3 Monthly ecological base flow of different hydrological monitoring sections in Niya River Basin

/$m^3 \cdot s^{-1}$

月份	尼雅水库	八一八渠首	尼雅水文站	尼雅渠首
1	0.018	0.02	0.016	0.016
2	0.019	0.021	0.017	0.016
3	0.031	0.034	0.028	0.027
4	0.172	0.188	0.151	0.147
5	1.857	2.034	1.638	1.590
6	5.664	6.195	4.995	4.842
7	8.721	9.540	7.692	7.458
8	5.652	6.183	4.986	4.833
9	1.530	1.674	1.350	1.308
10	0.134	0.231	0.118	0.114
11	0.056	0.092	0.049	0.048
12	0.023	0.039	0.020	0.020
汛期	4.685	5.125	4.132	4.006
非汛期	0.065	0.089	0.057	0.055

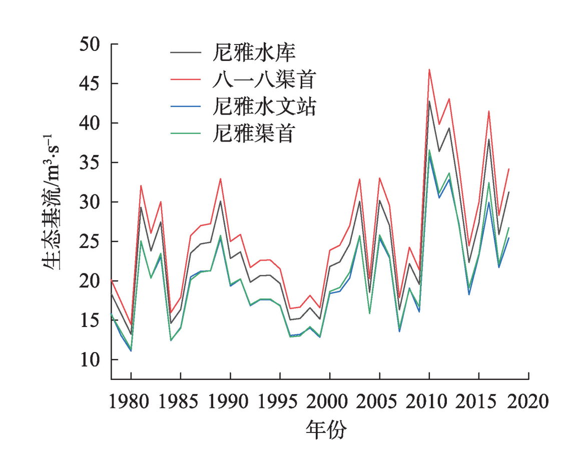


图5 尼雅河流域不同水文监测断面逐年生态基流变化

Fig. 5 Annual ecological base flow change of different hydrological monitoring sections in Niya River Basin

表现为上游高下游低、季节性差异显著的特点，且以八一八渠首处为最高值，尼雅水库次之，全年各季节生态基流值均保持八一八渠首>尼雅水库>尼雅水文站>尼雅渠首的状况。造成各水文监测断面生态基流空间差异的主要原因：一是随尼雅河自昆仑山流向塔克拉玛干沙漠的过程中径流量逐渐减少（八一八渠首因有恰克达支流汇入，径流量增加而使生态基流增大）；二是农业灌溉、工业生产和生活用水等也在不同程度上影响着生态基流的空间差异。生态基流的这种空间分布格局与绿洲的需水格局相对应，即从上游至下游随绿洲规模的减小，生态基流也相应减少。按照生态基流的实际定

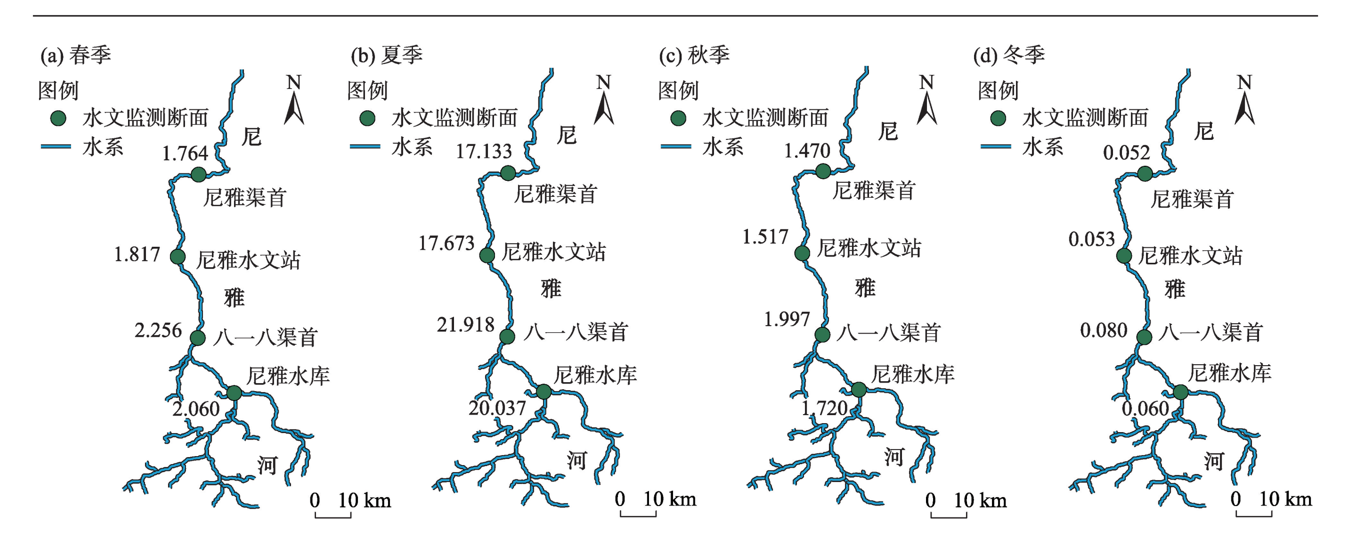


图6　尼雅河流域不同水文监测断面四季生态基流空间分布

Fig. 6　Spatial distributions of ecological base flow in four seasons at different hydrological monitoring sections in Niya River Basin

义，下游的生态基流应该相对更大一些，而本文则相反，主要是因为实测流量沿途减少造成。

3.2.3　生态基流及其保障率分析　计算尼雅水库、八一八渠首、尼雅水文站和尼雅渠首4个水文监测断面1978—2018年的逐年生态基流保证率见图7所示，据此推算出各站多年平均生态基流保证率分别为：50%、45%、50%、45%。

据图7分析，尼雅河流域各断面的多年生态基流保证率变化趋势基本相似，其中八一八渠首与尼雅渠首的变化趋势基本一致，尼雅水库与尼雅水文站的变化趋势一致。各断面的年生态基流保证率均在60%以下，最高为58.33%，最低为33.33%，多数年份都在41.67%左右波动，且在汛期河流径流能够

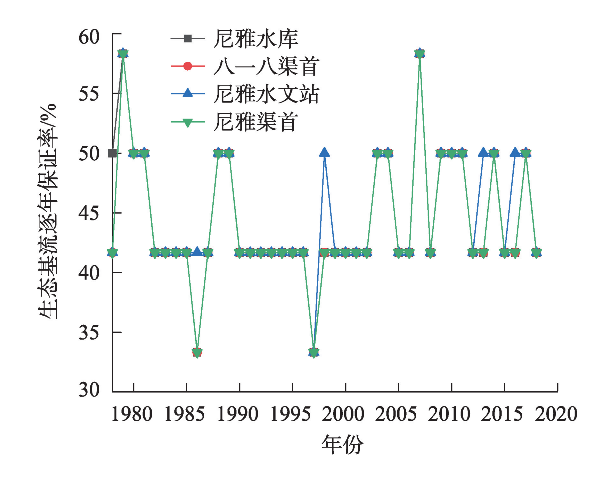


图7　尼雅河流域不同水文监测断面逐年生态基流保证率

Fig. 7　Annual ecological base flow assurance of different hydrological monitoring sections in Niya River Basin

满足生态基流的要求，而非汛期生态基流常难以得到保证。造成非汛期尼雅河流域生态基流得不到保证的原因主要有：一是流域位于内陆干旱区，汛期径流量约占全年径流量的98%，非汛期河流径流量小、断流早且持续时间长；二是河流各处修建的蓄水灌溉工程，使其生态水量进一步减少，每当春季农业用水较大时表现得尤为突出；三是流域生活用水逐年增加，这在非汛期挤占河道内生态用水十分明显，也是造成生态基流难以得到保证的一个重要原因。

3.3　生态基流对气候变化的响应

将尼雅河流域4个水文监测断面的逐年生态基流值加权平均得到流域整体逐年生态基流值，并用其与流域1978—2018年同期年均气温和年降水量进行相关性分析。结果表明逐年、逐月生态基流与气温、降水量在0.01水平上呈显著相关，其中年生态基流与年均气温的相关系数r=0.257，显著性P=0.105；与年降水量的相关系数r=0.593，显著性P=0.000。导致年生态基流与年均气温相关性偏低的主因是：第一是气温的年际波动比较大，第二是年均气温的增长率较低(0.022 ℃·a^{-1})。逐月生态基流与逐月气温、降水量的相关性均较高(相关系数和显著性分别为：r=0.758，P=0.004；r=0.862，P=0.000)，融雪、降雨是径流量的关键驱动因素，而生态基流又由实测流量分析得到，因此相关性较高，这与同地区其他研究结果一致[25-26]。通过敏感性分析，发现春夏季生态基流对气温敏感，秋冬季则对降水量

敏感,这与尼雅河地处干旱区属冰川融雪补给的河流性质有关。通过进一步回归分析得到生态基流与年降水量、年均气温的回归方程,结果见表4所示。

由表4可知,在研究时段内,尼雅河流域生态基流与气候变化呈明显正相关,各水文监测断面的回归模型耦合效果相似,流域整体回归方程为 $y=0.89x_1+0.11x_2+0.298$, $R^2=0.365$,表明生态基流对气候变化的响应不是某一处的瞬时突变,而是整体缓慢发生的。

表4 年生态基流与年降水量、年均气温的回归方程

Tab. 4 Regression equation of ecological base flow with annual precipitation and average annual temperature

水文监测断面	回归方程	残差平方和	R^2
尼雅水库	$y=0.099x_1+0.012x_2+0.253$	9.009	0.368
八一八渠首	$y=0.108x_1+0.013x_2+0.275$	10.782	0.368
尼雅水文站	$y=0.065x_1+0.01x_2+0.445$	6.229	0.353
尼雅渠首	$y=0.084x_1+0.01x_2+0.216$	6.590	0.368
流域整体	$y=0.89x_1+0.11x_2+0.298$	8.037	0.365

注:y 为年生态基流;x_1 为年降水量;x_2 为年均气温。

综合上述对气候、生态基流及二者变化的分析,得出尼雅河流域正处于逐渐变暖变湿过程,在此气候变化背景下流域生态基流也随之发生同步高低变化的响应,这种响应具有整体性,且在丰水年表现尤为强烈,并随河流流向而缓慢衰减。

4 结 论

(1) 1958—2018年尼雅河流域年均气温和年降水量整体表现出波动上升的过程,气候变化呈暖湿化的发展趋势,其中气温以0.22 ℃·$(10a)^{-1}$的速度增暖,年降水量以3.8 mm·$(10a)^{-1}$的速度增湿。

(2) 基于尼雅河4个水文监测断面1978—2018年的水文数据,通过Tennant法等3种水文学方法计算、确定各断面逐月生态基流值,并基于此得到尼雅水库、八一八渠首、尼雅水文站和尼雅渠首的年生态基流推荐值分别为:1.989 $m^3 \cdot s^{-1}$、2.188 $m^3 \cdot s^{-1}$、1.755 $m^3 \cdot s^{-1}$、1.702 $m^3 \cdot s^{-1}$。

(3) 从时间上分析,尼雅河流域生态基流表现为总体呈波动上升、年际与年内变化大的特征,最大值出现在2010年,最小值出现在1980年,年内汛期和非汛期差异十分显著,各断面汛期生态基流量均占到占全年生态基流的98%以上。从空间分布来看,生态基流总体表现为上游高下游低、季节性差异显著的特点,且最高值在八一八渠首,最低值在尼雅渠首。

(4) 各断面保证率变化具有相似性,其中尼雅水库和尼雅水文站多年平均生态基流保证率为50%,八一八渠首和尼雅渠首为45%。在研究时段内,年保证率最高为58.33%,最低为33.33%,且年内非汛期生态基流难以得到保证,主要原因是河流流量小断流早且持续时间长、蓄水灌溉工程使用频繁和生活用水逐年增加。

(5) 相关分析表明逐年、逐月生态基流与气温、降水量均在0.01水平上显著相关,但春夏季生态基流对气温敏感,秋冬季对降水量敏感。各水文监测断面的回归模型耦合效果相似,流域整体回归方程为 $y=0.89x_1+0.11x_2+0.298$, $R^2=0.365$,生态基流对气候变化响应具有整体性,且在丰水年表现强烈,并随河流流向而缓慢衰减。

参考文献(References)

[1] Arthington A H, Naiman R J, Mcclain M E, et al. Preserving the biodiversity and ecological services of rivers: New challenges and research opportunities[J]. Freshwater Biology, 2010, 55(1): 1-16.

[2] Vrsmarty C J, Mcintyre P, Gessner M, et al. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. Nature, 2010, 467 (7315): 555-561.

[3] 严登华, 王浩, 王芳, 等. 我国生态需水研究体系及关键研究命题初探[J]. 水利学报, 2007, 38(3): 267-273. [Yan Denghua, Wang Hao, Wang Fang, et al. Frame of research work on ecological water demand and key topics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(3): 267-273.]

[4] Dakova S, Uzunov Y, Mandadjiev D. Low flow: The river's ecosystem limiting factor[J]. Ecological Engineering, 2000, 16(1): 167-

174.
[5] 陈昂, 隋欣, 廖文根, 等. 我国河流生态基流理论研究回顾[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(6): 401-411. [Chen Ang, Sui Xin, Liao Wengen, et al. Review study on instream ecological base flow in China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016, 14(6): 401-411.]
[6] 徐宗学, 武玮, 于松延. 生态基流研究: 进展与挑战[J]. 水力发电学报, 2016, 35(4): 1-11. [Xu Zongxue, Wu Wei, Yu Songyan. Ecological baseflow: Progress and challenge[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(4): 1-11.]
[7] Nie J, Sobel A H, Shaevitz D A, et al. Dynamic amplification of extreme precipitation sensitivity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(38): 9467-9472.
[8] 顾磊, 陈杰, 尹家波, 等. 气候变化下中国主要流域气象水文干旱潜在风险传播[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 321-333. [Gu Lei, Chen Jie, Yin Jiabo, et al. Risk propagation from meteorological to hydrological droughts in a changing climate for main catchments in China[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 321-333.]
[9] 冉玲, 朱海江, 阿依努尔·孜牙别克. 1962—2007年新疆塔城白杨河流域气候变化对水文情势的影响[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 921-926. [Ran Ling, Zhu Haijiang, Ziyabuick Ainur. Impact of climate change on hydrological regime in the Baiyanghe River Basin in Tacheng, Xinjiang during 1962—2007[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 921-926.]
[10] 苏宏超, 沈永平, 韩萍, 等. 新疆降水特征及其对水资源和生态环境的影响[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 343-350. [Su Hongchao, Shen Yongping, Han Ping, et al. Precipitation and its impact on water resources and ecological environment in Xinjiang Region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 343-350.]
[11] Sisto N P. Environmental flows for rivers and economic compensation for irrigators[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(2): 1236-1240.
[12] Gippel C J, Stewardson M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows[J]. Regulated Rivers: Research and Manangment, 1998, 14(1): 53-67.
[13] Matthews R C, Bao Y. The Texas method of preliminary instream flow determination[J]. Rivers, 1991, 2(4): 295-310.
[14] 徐宗学, 彭定志, 庞博. 河道生态基流理论基础与计算方法——以渭河关中段为例[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 64-88. [Xu Zongxue, Peng Dingzhi, Pang Bo. Theoretical basis and calculation method of river ecological base flow: Taking Guanzhong section of Weihe River as an example[M]. Beijing: Science Press, 2016: 64-88.]
[15] 于松延, 徐宗学, 武玮. 基于多种水文学方法估算渭河关中段生态基流[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(增刊1): 175-179. [Yu Songyan, Xu Zongxue, Wu Wei. Ecological baseflow in the Guanzhong reach of the Wei River estimated by using different hydrological methods[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2013, 49(Suppl. 1): 175-179.]
[16] 崔瑛, 张强, 陈晓宏, 等. 生态需水理论与方法研究进展[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 465-480. [Cui Ying, Zhang Qiang, Chen Xiaohong, et al. Advances in the theories and calculation methods of ecological water requirement[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(4): 465-480.]
[17] 邓铭江, 王世江, 董新光, 等. 新疆水资源及可持续利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 126-148. [Deng Mingjiang, Wang Shijiang, Dong Xinguang, et al. Water resources and sustainable utilization in Xinjiang[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2005: 126-148.]
[18] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fish Eries, 1976, 1(4): 6-10.
[19] 黄康, 李怀恩, 成波, 等. 基于Tennant方法的河流生态基流应用现状及改进思路[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 103-110. [Huang Kang, Li Huai'en, Cheng Bo, et al. Application status and improvement ideas of river ecological base flow based on Tennant method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(5): 103-110.]
[20] 李肖杨, 朱成刚, 马玉其, 等. 新疆孔雀河流域生态基流与天然植被需水量研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 337-345. [Li Xiaoyang, Zhu Chenggang, Ma Yuqi, et al. Ecological baseflow and natural vegetation water requirement of Konqi River Basin, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 337-345.]
[21] 吴喜军, 李怀恩, 董颖, 等. 基于基流比例法的渭河生态基流计算[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 154-159. [Wu Xijun, Li Huai'en, Dong Ying, et al. Calculation of ecological basic flow of Weihe River based on basic flow ratio method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(10): 154-159.]
[22] 焦文慧, 张勃, 马彬, 等. 近58 a中国北方地区极端气温时空变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1220-1230. [Jiao Wenhui, Zhang Bo, Ma Bin, et al. Temporal and spatial changes of extreme temperature and its influencing factors in northern China in recent 58 years[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1220-1230.]
[23] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219-226.]
[24] 吴秀兰, 张太西, 王慧, 等. 1961—2017年新疆区域气候变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(4): 27-34. [Wu Xiulan, Zhang Taixi, Wang Hui, et al. Characteristics of temperature and precipitation change in Xinjiang during 1961—2017[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(4): 27-34.]
[25] 柏玲, 刘祖涵, 陈忠升, 等. 开都河源流区径流的非线性变化特征及其对气候波动的响应[J]. 资源科学, 2017, 39(8): 1511-1521. [Bai Ling, Liu Zuhan, Chen Zhongsheng, et al. Runoff non-

linear variation and responses to climate fluctuation in the headwater region of the Kaidu River[J]. Resources Science, 2017, 39(8): 1511-1521.]

[26] 傅丽昕, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河三源流区气候变化对径流量的影响[J]. 干旱区地理, 2008, 31(2): 237-242. [Fu Lixin, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Influence of climatic change on runoff and water resources in the headwaters of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(2): 237-242.]

Ecological base flow in Niya River Basin under climate change

HU Keke[1,2], HE Jiancun[3], ZHAO Jian[3], SU Litan[1], ZHANG Yin[1,2]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Water Resources Planning and Research Institute of Xinjiang Water Resources Department, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: Watershed ecological base flow is crucial for the health and stability of river ecosystems. On the basis of meteorological data obtained by the meteorological station of Minfeng County, Xinjiang, China during 1958—2018 and hydrological data obtained by four hydrological monitoring sections in the Niya River from 1978—2018, we reveal the response of ecological base flow to climate change using trend fitting, Tennant method, correlation analysis, and regression model to analyze the climate change, determine the ecological base flow, and explore its spatiotemporal differentiation and guarantee rate change. Results show that air temperature and precipitation increased at a rate of 0.22 ℃·$(10a)^{-1}$ and 3.8 mm·$(10a)^{-1}$, respectively, in the past 61 a. For Niya Reservoir, 818 Canal Head, Niya hydrology station, and Niya Canal head, the recommended annual ecological base flow values are 1.989 $m^3 \cdot s^{-1}$, 2.188 $m^3 \cdot s^{-1}$, 1.755 $m^3 \cdot s^{-1}$, and 1.702 $m^3 \cdot s^{-1}$, respectively. The interannual minimum and maximum of the ecological base flow occurred in 1980 and 2010, respectively; the annual maximum occurred in July, and the minimum occurred in January or December. Spatially, it is higher in the upper reaches and lower in the lower reaches, with the highest at the head of 818 Canal and the lowest at the head of Niya Canal. The annual average ecological base current guarantee rate of each station is 50%, 45%, 50%, and 45%, respectively, and it is significantly higher during the flood season than the nonflood season. A significant correlation exists between annual and monthly ecological base flow and temperature and precipitation at the 0.01 level, but it is sensitive to temperature in spring and summer, and to precipitation in autumn and winter. The coupling effect of regression models of all hydrological sections is similar, with the basin overall regression equation obtaining R^2=0.365. The response of ecological base flow to climate change has the characteristics of integrity and attenuation. These results can provide a reference for ecological water diversion and water ecological restoration in the Niya River Basin.

Key words: climate change; ecological base flow; hydrologic method; assurance; Niya River